



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Petteri Korpelainen

BETONIRAKENNUKSEN JÄYKISTYS- JÄRJESTELMÄT JA -MITOITUS

Tekniikka
2018

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Petteri Korpelainen
Opinnäytetyön nimi	Betonirakennuksen jäykistysjärjestelmät ja -mitoitus
Vuosi	2018
Kieli	suomi
Sivumäärä	39 + 4 liitettä
Ohjaaja	Jari Lehtiö

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali sen hyvän puristuslujuuden ja muokattavuuden ansiosta. Tässä opinnäytetyössä esittelen betonirakennuksen jäykistysjärjestelmät, sekä jäykistysmitoituksen kulun. Vertaan myös mitoitusten käyttökelpoisuutta eri tilanteissa.

Rakennuksen jäykistysmitoituksella selvitetään rakennukselle sopiva jäykistysjärjestelmä, mikä pystyy siirtämään rakennusta rasittavat kuormitukset perustuksille, ja aina maaperään saakka. Lähtökohtana on, että rakenteen staattinen tasapaino on riittävä, eli varmistetaan, että rakennus ei kaadu. Tässä työssä olen käyttänyt lähteenä betoniyhdistyksen kirjallisuutta, sekä internetlähteitä. Esimerkkimitoituksen olen tehnyt Mathcadilla, sekä Autodeskin Robot structural FEM -ohjelmalla.

Opinnäytetyön lopputulos esittelee jäykistysjärjestelmät, niiden käyttökohteet, sekä positiiviset ja negatiiviset ominaisuudet. Lisäksi kappaleissa 3 - 5 on esitelty jäykistysmitoitus, sen kulku, ja suoritettu vertailua kokonaistaloudellisesti kustannustehokkaan mitoituskeinon löytämiseksi tilanteesta riippuen.

ABSTRACT

Author	Petteri Korpelainen
Title	Stiffening Systems and Dimensioning of a Concrete Building
Year	2018
Language	Finnish
Pages	39 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Jari Lehtiö

Concrete is most used building material in the world, because it has high compressive strength and modularity. In this thesis, the concrete structure reinforcement systems, and dimensioning of stiffening are presented. The usability of dimensions in different situations is also compared.

Stiffening dimensioning of building determines the suitable stiffening system for the building, which can transfer loads and stresses to the foundation, and always up to the ground. The point is that the static balance of the structure is sufficient to ensure that the building does not fall. In this thesis, literature from Betoniyhdistys, and internet sources were used as source material. An example of the dimensioning was made with Mathcad and Autodesk Robot structural FEM -program.

The results of the thesis presents stiffening systems, their applications, and positive and negative features. In addition, the dimensioning of stiffening and how it works, and comparison of the economically viable cost-effective design tool are also presented.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SANASTO	7
1 JOHDANTO.....	9
2 BETONIRAKENNUKSEN JÄYKISTYSÄRJESTELMÄT	10
2.1 Mastojäykistys	11
2.2 Kehäjäykistys	13
2.3 Levyjäykistys	13
2.4 Ristikkojäykistys.....	14
2.5 Useiden jäykistysjärjestelmien yhdistelmä	15
3 JÄYKISTYSMITOITUS.....	16
3.1 Mitoituksen kulku	16
3.2 Murtorajatilamitoitus	18
3.3 Käyttörajatilamitoitus	18
4 ESIMERKKIMITOITUS	20
4.1 Kuormat	20
4.2 Mitoitus Mathcad -ohjelmiston avulla	22
4.3 Mitoitus Autodesk Robot structural -ohjelmiston avulla.....	29
4.3.1 Robot-mallin luonti	29
4.3.2 Tulosten tulkinta	31
5 MITOITUSTEN VERTAILU	35
5.1 Mitoitustavan valinta	35
5.2 Tulosten vertailu	36
6 YHTEENVETO JA HAVAINNOT	37
LÄHTEET.....	39

LIITTEET

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Jäykistävät osat merkitty punaisella	23
Kuva 2. Jäykistävien osien etäisyys kiertokeskiöön	23
Kuva 3. Rakennuksen jäykistävät osat Robot-mallissa	30
Kuva 4. Rakennuksen omapaino Robot-tuloksista	32
Taulukko 1. Esimerkkikohteen lähtötiedot	20
Taulukko 2. Kuormitukset esimerkkikohteessa	30

LIITELUETTELO

LIITE 1. Tuulikuorma lyhyempää sivua vasten

LIITE 2. Tuulikuorma pidempää sivua vasten

LIITE 3. Lisävaakavoimat

LIITE 4. Robot-tulokset

SANASTO

FEM-ohjelmisto eli Finite element method, on elementtimenetelmiin perustuva laskentaohjelma, johon voidaan luoda laskentamalli, jonka tuloksena saadaan runsaasti numeerista tulostietoa. Työväline rakenteiden analysointiin. /10/ /11/

Murtorajatila on rakenteen sortumiseen tai kantokyvyn menettämiseen liittyvä tila /5/

Käyttörajatila on tila, jonka jälkeen rakenteen käyttökelpoisuuteen liittyvät vaatimukset eivät täyty. Liittyvät rakenneosien toimintaan normaalikäytössä, ihmisten mukavuuteen ja rakennuksen ulkonäköön. /5/

Paikallavalettu betonirakenne on tuotantotekninen asia, betonirakenne valetaan työmaaolosuhteissa oikeaan paikkaan, eikä esimerkiksi tehtaalla. /12/

Stabiilius on tasapainoisuus, eli rakenne tai rakennus ei kaadu. /1/

Runkojärjestelmä on valittu runko, joka voi olla esimerkiksi pilari-palkki -järjestelmä, tai kantavista seinistä laattojen kanssa muodostuva kokonaisuus. /13/

Stabiileettitarkastelu on tasapainotarkastelu, jossa todetaan, että rakennusta pystyssä pitävä momentti on suurempi kuin rakennusta kaatava momentti valitun pisteen ympäri. /1/

Staattinen tasapaino on tasapainoinen tila /1/

Jatkuva sortuma on ketjureaktiomainen tilanne, jossa rakennus sortuu osa osalta ensimmäisen osan menetettyä toimintakykyänsä. Rakennukset tulee suunnitella onnettomuuksien varalta siten, että jatkuvaa sortumaa ei synny. /9/

Tasorakenteet ovat vaakatasossa kulkevat rakenteet, kuten alapohjat, välipohjat ja yläpohjat. Jäykistysmitoitusta tehdessä ne toimivat omassa tasossaan jäykkinä levyinä.

Tukireaktio on kuorman x- ja y-suuntaisista komponenteista muodostuva pari, joka vaikuttaa kappaleen reunoilla. Kappaleen tukireaktiot tulee saada tasapainoon, jotta kappale saadaan tasapainoon.

Jäykkä kiinnitys on kiinnitys, missä rakenteen poikkipinta ei pääse kiertymään, siirtymään tai käyristymään, eli se välittää momenttia ja vastustaa kiertymää.

Nivelellinen kiinnitys on kiinnitys, missä rakenteen poikkipinta pääsee kiertymään.

Normaalivoima on kohtisuoraan tarkastelutasoon (pintaan) vaikuttava voima /14/

Momentti voidaan ajatella kappaletta ”pyörittävänä voimana”, joka saadaan kertomalla voiman suuruus sen vaikutuspisteen ja pyörimisakselin välisellä etäisyydellä.

Elementti on tehdasolosuhteissa valmistettu rakenneosaa tai rakennuskokonaisuus, joka kuljetetaan työmaalle asennusta varten.

Vaarnoitus on rakenneosien liitos, jossa osat liitetään toisiinsa tappimaisilla ratkaisulla, jossa tapit välittävät voimat osasta toiseen.

Liikuntasärmä on rakenne, joka estää siihen kohdistuvien rasitusten siirtymisen rakenneosasta toiseen, ja sallii rakenteiden liikkeen. /15/

Eurokoodi on kantavien rakenteiden suunnittelustandardeja, jotka on kehitetty eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukykyyn parantamiseksi. /16/

Kansallinen liite on ympäristöministeriön laatima ohje, jolla pystytään soveltaamaan eurokoodien vaatimuksia Suomen olosuhteisiin ja mitoitusoloihin. /8/

Kiertokeskiö on piste, jossa rakennus on tasapainossa, ja joka on riippuvainen rakenneosien jäykkyydestä. /1/

1 JOHDANTO

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali. Betonin vahvuus on sen korkea puristuslujuus ja muokattavuus, mikä mahdollistaa sen käytön moniin rakennuksiin ja rakenteisiin, myös korkeisiin. Betonilla on myös hyvä vastustuskyky ulkoisia ja sisäisiä vauriotekijöitä vastaan. Jäykistys on olennainen osa jokaista rakennusta, ja se on suunniteltava jokaiseen rakennukseen erikseen. Aihe on siis erittäin merkittävä, ja tämän päivän FEM -ohjelmistoja hyödyntämällä pystytään tehokkaaseen ja kokonaistaloudellisesti järkevään mitoittamiseen. Ohjelmistot ovat kehittyneet paljon viimeisen vuosikymmenen aikana, mikä mahdollistaa niiden käytön yleistymisen jokapäiväisessä rakennesuunnittelussa. Viime vuosina uuden sukupolven suunnittelijat ovat siirtyneetkin ja tulevat siirtymään yhä enemmän tähän, vanhojen aikaa vievämpien menetelmien sijaan. /17/

Tämän työn tarkoituksena on esitellä erilaiset jäykistysjärjestelmät, sekä tehdä betonirakennuksen jäykistysmitoitus Suomeen rakennettavaan rakennukseen. Mitoituksen teen Mathcadilla, ja Autodesk Robot structural -ohjelmalla, ja erityisesti tarkastelen ja vertailen niiden käyttökelpoisuutta ja ominaisuuksia. Lisäksi esittelen mitoituksen kulun, betonirakennuksen FEM-laskennassa huomioitavat asiat, sekä mitoituksen murto- ja käyttörajoituksissa. Tässä työssä esitellään myös jäykistysjärjestelmät, niiden käyttökelpoisuudet eri kohteissa, ja mitkä ovat kunkin menetelmän hyvät ja huonot puolet. Tarkoitus on keskittyä lähinnä paikallavalettuihin betonirakenteisiin. Tämän opinnäytetyön lähteinä käytän betoniyhdistyksen julkaisuja, sekä muita alan kirjoja. Lisäksi lähteinä ovat myös internetsivustot, artikkelit, sekä luentomateriaalit.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Contria Oy. Contria Oy on vuonna 2009 perustettu Vaasassa ja Seinäjoella toimiva rakennusalan konsulttitoimisto, jonka päätoimiala on rakennesuunnittelu. Yritys on paikallisesti tunnettu, ja sillä on merkittävä asema alueen rakennesuunnittelussa. /18/

2 BETONIRAKENNUKSEN JÄYKISTYSÄRJESTELMÄT

Rakennuksen suunnittelun perusvaatimuksena on sen rungon riittävän stabiiliuden, eli tasapainon varmistaminen. Rakennukseen kohdistuu erilaisia vaaka- ja pystykuormia, jotka runkojärjestelmän on kyettävä siirtämään perustuksille, joiden kautta aina maaperään saakka. Rakennesuunnittelijan tehtävänä on laatia rakennuksen työaikainen ja lopullinen vakavuus- eli stabiliteettitarkastelu, ja pystyttävä osoittamaan kaikkien kuormien siirtymistiet rakenneosasta toiseen luotettavasti. Mikäli rakennuskohteessa on useita suunnittelijoita, on aina nimettävä pääsuunnittelija, joka vastaa, että osasuunnitelmista muodostuu rakenteelliset vaatimukset täyttävä kokonaisuus. Jäykistysjärjestelmän tehtävänä on siirtää rakennusta kuormittavat vaakakuormat perustuksille ja sitä kautta maaperään. Vaakakuormia ovat rakennukseen kohdistuvat tuulikuormat, jonka lisäksi on huomioitava myös mahdolliset rakennuksen sisällä vaikuttavat kiihtyvyysoimat, kuten esimerkiksi nosturien jarrutuksesta aiheutuvat voimat. Jäykistysjärjestelmää suunniteltaessa on huomioitava monia seikkoja. Lähtökohtana on, että rakenteen staattinen tasapaino on riittävä, eli varmistetaan, että rakennus ei kaadu. Minkään jäykistysjärjestelmän osan kapasiteetti ei saa ylittyä missään kuormitustapauksessa. On myös varmistettava, että osien siirtymät ja muodonmuutokset pysyvät riittävän pieninä, eivätkä siten aiheuta rakennuksen käyttökelpoisuudelle tai ihmisten turvallisuudelle haittoja. Onnettomuustilanteet huomioidaan siten, että rakenteellisin keinoin pyritään estämään jatkuva sortuma. Yksi huomioitavista asioista on asennustilanteen jäykistys. Asennusaikana jäykistykseen on oltava riittävä joka hetkellä, ja asennusvaiheen stabiliteetti on tutkittava aina erikseen. Asennusaikainen jäykistys on tärkeää tutkia siksi, että jäykistysjärjestelmä toimii lopullisesti halutulla tavalla vasta, kun kaikki eri osien väliset liitokset ovat valmiita. Eli asennusaikainen jäykistysjärjestelmä ja jäykistävät rakenteet voivat poiketa lopullisesta järjestelmästä. /1,3/

Jäykistystapoja on monia erityyppisiä, jotka on esitelty alla. Jäykistystavan valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa rakennejärjestelmä, mittasuhteet, kustannustehokkuus, rakennuksen muuntojoustavuus, arkkitehtuuri ja käyttötarkoitus. Suomessa rakennettujen halli-, toimisto- ja monikerroksisten asuinrakennusten

pääasiallinen jäykistystapa on mastopilari- ja mastoseinäjäykistys, ja näiden yhdistelmät. Jäykistystavasta riippumatta on oleellista, että tasojen vaakarakenteet siirtävät kuormat jäykistäville pystyrakenteille, joiden kautta rasi-
tukset siirretään perustuksille ja maaperään. Rakennuksen vaakakuormia siirtävät tasorakenteet onkin mitoitettava siten, että ne pystyvät vastaanottamaan vaakakuormituksen kokonaisuudessaan, sekä siirtämään sen liitosten avulla pystyrakenteisiin. Tasorakenteen liitos pystyrakenteeseen mitoitetaan kyseisten kuormien tukireaktioille. /1,3/

Jäykistävät pystyrakenteet saavat kuormat kultakin tasorakenteelta jäykkyyksiensä suhteessa. Jäykistysrakenteita mitoittaessa on selvitettävä kunkin rakenteen todelliset jäykkyydet tarkasti. Jäykkyydet pystytään selvittämään luotettavasti, kun lasketaan rakennuksen jäykistys FEM-ohjelmalla. Tässä työssä FEM-laskenta, ja sen kulku on esitelty kappaleessa 4.3. Mitoituksessa on huomioitava tarkasti jäykkyyteen vaikuttavat tekijät, kuten aukot seinissä tai betonin halkeilu. Myös rakenteiden tuentatapa on laskennassa huomioitava seikka, mikä vaikuttaa kuormien jakautumiseen. /1,3/

2.1 Mastojäykistys

Mastojäykistysmenetelmässä rakennuksen jäykistävät seinät toimivat ulokepalkin tavoin alapäästään jäykästi kiinnitettyinä ulokepalkkeina. Rakennuksen välipohjat toimivat jäykkinä levyinä, jotka siirtävät rakennukseen kohdistuvat vaakakuormista aiheutuvat rasitukset jäykistäville seinille niiden jäykkyyksien suhteessa. Rungon muut pystyrakenteet toteutetaan rakennuksessa nivelliitoksilla, mikä on taloudellista ja aikataulullisesti edullista. Mastojäykistyksen etuna voidaan pitää myös asennettavuutta, sillä asennusaikaisia tukia ei yleensä juuri tarvita. Mastojäykistys voidaan jakaa kolmeen alatyyppiin: mastopilarijäykistykseen, mastoseinäjäykistykseen ja jäykistystorniin. /3/

Mastopilarijäykistyksessä pilarit ovat kiinnitetty jäykästi alapäästään perustuksiin, ja toimivat ulokkeina vaakakuormia vastaan. Vaakakuormat siirtyvät pilareilla ulkoseinä-
rakenteiden välityksellä, sekä jäykkien tasorakenteiden kautta. Palkit kiinnitetään pilareihin nivelellisesti, huomioiden kuitenkin, että ne pystyvät siir-

tämään vaakavoimat. Jäykät tasorakenteet suunnitellaan siten, että ne siirtävät vaakavoimat pilareille niiden jäykkyyksien suhteessa. Mastopilareille tulevat rasitukset siirretään jäykän liitoksen kautta perustuksille, josta se johdetaan maaperään joko suoraan, tai paalujen kautta. Jäykistysmenetelmänä mastopilarijäykistys soveltuu parhaiten kohtalaisen mataliin rakennuksiin, noin 1 - 4 kerroksisiin. Käyttökelpoisuuden maksimini voidaan pitää noin 12 metrin korkeutta, jonka jälkeen pilareiden poikkileikkausmitat kasvaisivat niin suuriksi, että se olisi epätaloudellista ja siirtymien hallinta hankaloituisi. /3/

Mastoseinäjäykistys toimii samoin kuin mastopilarijäykistys, ulokepalkin tavoin alapäästään jäykästi kiinnitettynä perustuksiin. Joissain tapauksissa mastoseinä voidaan kiinnittää perustuksiin myös ääripisteistään, jolloin kiinnityspisteiden normaalivoimien muodostama voimapari vastaa maston taivutusmomenttia. Suunnittelun lähtökohtana voidaan pitää, että mastoseinät tulisi sijoittaa mahdollisimman symmetrisesti rakennukseen. Vaakakuormat siirtyvät tasorakenteilta seinille. Seinämastot voivat olla paikallavalettuja, tai seinäelementtejä, joiden pysty- ja vaakasaumat mitoitetaan siirtämään normaalivoima- ja leikkausrasitukset siten, että ne toimivat yhtenäisenä rakenteena. Mastoseinät suunnitellaan siten, että ne sijoitetaan rakennukseen paikkoihin, joissa ne ottavat riittävät pystykuormat, jolloin mastoseinä on puristettu kaikissa kuormitustapauksissa. Mikäli mastoseinä kuitenkin joudutaan suunnittelemaan siten, että siihen kohdistuu myös vetoa, on huomioitava myös vetovoimien siirtäminen maapohjaan asti. Tämä voidaan hoitaa jännitetyillä maa- ja kallioankkureilla. Tämä on kuitenkin erikoistapaus, ja sitä tulisi pyrkiä välttämään. Halkeilun ja rakenteen muodonmuutoksen hallintaa voidaan parantaa jälkijännittämällä mastoseiniä. Vaakasuorien leikkausvoimien siirtämiseen käytetään vaarnoitusta, terästappeja, ja vastaavia liitosmenetelmiä. Mastoseinäjäykistyksen etuna verrattaessa mastopilarijäykistykseen voidaan pitää sitä, että sillä pystytään toteuttamaan myös korkeampia rakennuksia. Muita mastoseinäjäykistysjärjestelmän etuja ovat se, että muut rakennuksen pystyrakenteet saadaan poikkileikkaukseltaan pienemmiksi, sillä niille ei tarvitse siirtää jäykistyskuormia. Sen lisäksi vaakavoimien siirtämiseen tarvittavien saumatoteutusten määrä pystytään minimoimaan. Huonoina puolina pidetään seinien suuria vaati-

muksia raudoituskapasiteetilta, sekä joissain kohteissa tasojen ja seinien välillä vaakavoimia siirtävien liitosten toteutus voi muodostua vaikeaksi. /3/

Jäykistystornit toimivat samoin kuin mastoseinät, eli ulokepalkkina perustuksista. Jäykistystorneja mitoitettaessa tärkeä seikka, joka tulee huomioida, on, että tornin eri seinien liittymät tulee mitoittaa kussakin liitoksessa vaikuttavalle leikkausvoimalle, jotta rakenteet saadaan toimimaan yhdessä. Jäykistystornien etuna on, että niitä voidaan käyttää myös hyvinkin korkeissa rakennuksissa. /3/

2.2 Kehäjäykistys

Kehäjäykistysmenetelmässä muodostetaan pilareista ja palkeista kehämäisiä rakenteita, joissa pilareiden alapäävät voivat olla nivelellisesti tai jäykästi kiinnitetty perustuksiin, ja kehien nurkat jäykästi tai osittain jäykästi. Osittain jäykkänurkaisella jäykistyksellä rakenteiden vaakasiirtymien hallinta on kuitenkin vaikeampaa, eli nurkat pyritään yleensä suunnittelemaan jäykäksi. Kehäjäykistysmenetelmä soveltuu parhaiten paikallavalettuihin rakenteisiin, mutta se on mahdollista toteuttaa myös elementtirakentein. Kehäjäykistysratkaisulla rakennuksessa päästään vapaampiin tilojen käyttöön, sillä rajoittavat jäykistävät seinät puuttuvat. Kehäjäykistys soveltuu parhaiten 1 - 3 kerroksisiin rakennuksiin, ja sitä käytetään paljon teollisuusrakentamisessa. Kehäjäykistys on mahdollista toteuttaa rakennukseen myös vain toisessa suunnassa, jolloin toinen suunta jäykistetään vinotuilla tai levyseinillä. Etuna on myös, että käyttämällä jatkuvia palkkeja ja kerroksen korkuisia pilareita, saadaan palkit raudoitettua yksinkertaisemmin tukimomentille ja pilarien jäykkyydessä voidaan hyödyntää rakennuksen normaalivoimia. Näillä keinoin pystytään liitokset toteuttamaan pulttiliitoksina, jotka mitoitetaan kestämään pilarien päihin jäykistyksestä aiheutuvat momentit. Tämän menetelmän huonona puolena pidetään, että se asettaa vaatimuksia asennusjärjestykselle. Myös siirtymät ovat suurempia verrattaessa esimerkiksi levyjäykistykseen. /3/

2.3 Levyjäykistys

Levyjäykistyksessä ideana on nimensä mukaisesti, että rakennuksen rungon aukoihin sijoitetut levyt jäykistävät rakennuksen. Levymäiset rakenteet siirtävät

vaakakuormien aiheuttamat rasitukset levyjen leikkausvoimina rakenteille, josta se johdetaan perustuksille, ja aina maaperään asti. Samoin kuin muissakin järjestelmissä, rakennuksen tasorakenteet jakavat vaakakuormat levyille niiden jäykkyyksien suhteen. Jäykistäviä levyrakenteita tulee olla vähintään kolme, ja niitä tulee sijoittaa rakennuksen runkoon molempiin suuntiin. On myös tärkeää huomioida, että jäykistävillä levyille ei saa olla yhteistä leikkauspistettä. Optimaalisen sijoittelu levyrakenteille on, että ne sijaitsisivat symmetrisesti, sekä päällekkäin kaikissa kerroksissa. Se ei ole kuitenkaan välttämätöntä, jolloin joudutaan siirtämään vaakasuuntaisia leikkausvoimia tasorakenteissa, ja tämä voi aiheuttaa vaikeita liitosratkaisuja. Levyjäykistysjärjestelmän positiivisena puolena voidaan pitää, että perustusten koko saadaan pidettyä pienenä. Tämä johtuu siitä, että levyjäykisteisessä rakennuksessa on usein paljon jäykistäviä seiniä, jolloin kuormat saadaan jakaantumaan tasaisemmin koko rakennuksen alalle. Rakennus on myös usein todella jäykkä, jolloin siirtymät jäävät pieniksi. Positiivinen puoli on myös, että jäykistys ei aiheuta juurikaan rajoitteita sisätilojen käytölle. Huonona puolena tässä menetelmässä on, että se antaa vaatimuksia asennusjärjestykselle. /3/

2.4 Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistysjärjestelmä on toimintaperiaatteeltaan levyjäykistykseen kaltaisen. Jäykistävät levyt on vain korvattu puristus- ja vetosauvoilla. Tämän menetelmän ehdottomana positiivisena puolena on sen tilantarve, ristikoilla jäykistys saadaan hoidettua hyvinkin pienellä tilantarpeella. Tätä menetelmää voidaan siis käyttää levyjäykistykseen sijaan esimerkiksi pilari-palkkirunkoisessa rakennuksessa. Jäykistysristikot voidaan toteuttaa kahdella periaatteelta erilaisella tavalla: jäykistysristikko on osa pystykuormia kantavaa rakennetta, tai jäykistysristikko on oma erillinen osansa.

Kun jäykistysristikko on osa pystykuormia kantavaa rakennetta, niin ristikon paarteina voi toimia joko pilarit, tai seinät, jolloin ainoastaan veto- ja puristusdiagonaalit ovat jäykistysristikon erillisiä osia. Ristikon paarteet, eli tässä tapauksessa pilarit tai seinät, saavat vaakakuormituksesta aiheutuvan momentin seurauksena lisänormaalivoiman, joka tulee huomioida rakenneosien mitoituksessa. Mitoituk-

sessä on huomioitava myös kantavista rakenteista ristikon sauvoille tulevat mahdolliset lisäkuormat.

Ristikkojäykistykseen toinen menetelmä on siis, että jäykistysristikko toimii kokonaisuudessaan omana osana. Tässä menetelmässä ristikot sijoitetaan yleensä rakenteiden ulkopuolelle, jolloin niille tulevat pystykuormat ovat pieniä, ja niiden tarkoituksena onkin välittää vain vaakakuormia perustuksille. Tämä johtaa usein rakenteiden ankkurointiin.

Ristikkorakenteita voidaan käyttää työmailla myös asennusaikaisena jäykistykseenä ennen kuin varsinainen jäykistysjärjestelmä on saatu valmiiksi kokonaisuudessaan. Asennusaikaisena jäykistykseenä käytettäessä ristikon liitokset runkorakenteisiin toteutetaan usein pulttiliitoksilla, mikä mahdollistaa ristikoiden helpon poistamisen, kun varsinainen ja lopullinen jäykistysjärjestelmä saadaan valmiiksi.

2.5 Useiden jäykistysjärjestelmien yhdistelmä

Edellä esiteltyjen jäykistysmenetelmiä voidaan käyttää myös yhdistelminä. Tällä ratkaisulle haetaan tarkoituksenmukaisuutta, ja usein päästään kokonaistaloudellisesti edullisempiin ratkaisuihin. Esimerkiksi rakennuksen alaosa voi olla levyjäykistetty, mutta ylin kerros on mastopilarijäykistetty. Tässä ratkaisussa on huomioitava, että pilarien jäykkyydet ylimmässä kerroksessa ei ole samat, vaikka niiden poikkileikkaus olisikin sama. Tämä johtuu pilarien kiinnityksestä. Levyjäykiste alapuolella estää pilarin kiertymän, kun taas ylimmän kerroksen pilarissa kiertymää ei ole estetty. Tällä ratkaisulla säästetään kustannuksissa, ja se on tehokas ratkaisu asennuksen ja työjärjestyksen kannalta. Toinen paljon käytetty yhdistelmä on mastoseinä- ja kuilujäykistys yhdistettynä ristikkojäykistykseen. Mitoitettaessa yhdistelmäratkaisua on tärkeää huomioida, että vaakakuormat jakautuvat jäykistäville rakenteille niiden todellisten jäykkyyksien suhteessa. Esimerkiksi jäykistysseinä on huomattavasti jäykempi, kuin vastaavan korkuinen jäykistysristikko. Mallintamalla FEM-ohjelmaan rakenteet oikein, saadaan helposti ja melko luotettavasti ratkaistua kunkin osan todelliset jäykkyydet. /3/

3 JÄYKISTYSMITOITUS

3.1 Mitoituksen kulku

Jäykistyksen suunnittelulle annetaan kaksi perusvaatimusta:

1. Ilman suuria muodonmuutoksia tapahtuva vaakasuorien kuormien siirtyminen.
2. Pystyrakenteiden stabiiliuden säilyttämien ja varmistaminen. /1 s.180/

Betonirakennuksen jäykistysmitoitus voidaan jakaa neljään osaan:

1. Jäykistysmenetelmän valinta
2. Alustava jäykistysuunnittelu
3. Asennusaikainen jäykistys
4. Käyttötilanteen jäykistys, joka voidaan jakaa vielä neljään osaan:
 - a. Välipohjarakenteiden jäykistys yhtenäiseksi levyrakenteeksi
 - b. Vaakavoimien siirto jäykistäville rakenteille
 - c. Kuormien siirto perustuksille ja maaperään
 - d. Liitosten suunnittelu, sekä vakavuuden suunnittelu onnettomuustilanteiden varalta.

Alustavassa jäykistysuunnittelussa arvioidaan likimääräisesti jäykistyksen riittävyys ja varmistutaan, ettei jäykistävät rakenteet tai niiden jatkeet leikkaa toisiaan samassa pisteessä, eli jo tässä vaiheessa suunnitellaan jäykistävien osien sijoittelu. Näiden lisäksi tarkastellaan liikuntasauvojen tarve, sekä tarkistetaan jäykistyksen symmetrisyys. /9/

Asennusaikaisen jäykistyksen suunnittelusta haastavan tekee, että asennusvaiheessa tilanne rakenteiden jäykistyksen osalta muuttuu jatkuvasti. Huomioitavina asioina on kuormien muuttuminen. Yleensä omapaino, tuulikuorma, ja asennuksesta johtuvat kuormitukset, kuten rakenteiden vinous, sysäykset, liitosten tekemisestä mahdollisesti aiheutuvat rasitukset, tai rakennusmateriaalien varastointi rakenteiden päälle aiheuttavat kuormituksia, jotka voi vaihdella huomattavastikin eri rakennusvaiheissa. Rakenteiden asennusjärjestys pyritään suunnittelemaan ja toteuttamaan lähtökohtaisesti siten, että asennusaikaisia jäykistysjärjestelmiä tarvittaisiin mahdollisimman vähän. Tyypillisimpiä asennusaikaista jäykistysjärjes-

telmää vaativia rakenteita on pilarit, väliseinät, ja ulkoseinät. Asennusaikaisen stabiliteetin kannalta pilari-palkki liitokset pyritään suunnittelemaan mahdollisimman jäykäksi heti asennuksen jälkeen. Näihin ratkaisuihin päästään erilaisilla pultti-, holkki- ja hitsiliitoksilla. Näistä työmaateknisesti haastavin on hitsiliitos. Väli- ja ulkoseinärakenteet jäykistetään asennusvaiheessa vinotukien avulla. Vinotuet voidaan poistaa vasta, kun päälle tuleva laattarakenne on jäykistetty. Nyrkisääntönä voidaan pitää, että rungon asennuksen ei saisi kulkea kuin kaksi kerrosta sitä tasoa edellä, joka on täysin jäykistetty. Tämä johtuu siitä, ettei rakenteita jouduttaisi ylivoimittamaan käyttötilannetta ajatellen, mikä poikkeaisi huomattavasti asennusaikaisesta tilanteesta. /6,9/

Käyttötilanteen jäykistysuunnittelussa lasketaan ensimmäiseksi koko rakennusta rasittavat kuormitukset. Pystykuormien lisäksi lasketaan rakennukseen kohdistuva tuulikuorma, sekä lisävaakavoima. Tämä voima jaetaan jäykistäville rakenteille niiden jäykkyyksien suhteessa huomioiden kuitenkin rakennuksen kiertymät ja siirtymät. Kun jäykistykseen vaikuttavat kuormitukset on laskettu, ja jaettu eri osille, niin mitoitetaan rakenteet rajatilamitoitusohjeiden mukaisesti. Jäykistysuunnittelun viimeisessä vaiheessa tarkastellaan koko rakennuksen siirtymätilat ja taipumat. Rungon taipumalle ei ole rakentamismääräyskokoelmassa annettu yksiselitteistä raja-arvoa, mutta Suomessa on yleisesti käytetty mastoseinäjäykisteiselle rakennukselle ylärajana $H/1000$, missä H on rakennuksen korkeus. Taipumatarkasteluissa käytetään käyttötilan mukaisia kuormia, eli kuormia ilman varmuuskertoimia. /9/

Onnettomuustilanteiden varalta jäykistys suunnitellaan siten, että pyritään estämään jatkuva sortuma. Eli mitoituksessa tarkistetaan, että rakennus ei sorru, vaikka jokin sen jäykistävästä rakenteista menettäisikin toimintakykynsä. Vakavuus voidaan tarkistaa onnettomuustilanteen kuormilla tilanteessa, jossa jokin osa on poistettu. Onnettomuustilannetta mitoitettaessa kuorman ja materiaalin osavarmuuseroin on 1.0, ja hyötykuormiin voidaan tehdä kuormitusnormien sallimat vähennykset. Siirtymien tai muodonmuutosten sallittuja arvoja ei onnettomuustilanteen tapauksessa voida määrittää. Yleisin tapaus, joka tulee esille onnettomuustilannetta mitoitettaessa, on ulkoseinäpilarin mitoitus törmäyskuormalle. /6,9/

3.2 Murtorajatilamitoitus

Murtorajatilat ovat käyttörajatilan jälkeen kuorman lisääntymisen myötä kehittyviä tiloja, joissa rakenne tai sen osa menettää käyttökelpoisuutensa. /1 s. 195/ Oli valittu jäykistysjärjestelmä mikä tahansa, se tulee mitoittaa murtorajatilassa eurokoodien mukaisesti. Mitoitus murtorajatilassa liittyy aina osavarmuusmenettelyihin, jolloin tarkoituksena on osoittaa, että rakenteella on riittävä varmuus murtumista vastaan. Murtorajoiksi luokitellaan kaikki rajatilat, jotka liittyvät ihmisten turvallisuuteen tai rakenteiden varmuuteen. Joissakin tapauksissa myös aineen tai tavaran suojaaminen voidaan luokitella murtorajatilaksi. Mitoitettaessa rakennusta jäykistäviä rakenteita, niin tarkasteltavia murtorajatiloja on jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menetys, liian suuret siirtymätilat, ja rakenteen tai osan muuttuminen mekanismiksi. Tarkasteltavia asioita ovat myös ajasta riippuva vaurioituminen, kuten väsyminen. Tärkeimpänä tarkastettavana on koko rakennuksen staattisen tasapainon säilyminen, joka saadaan rakennukseen kohdistuvien pystyssä pitävien ja sitä kaatavaiden momenttien osamääränä valitun pisteen suhteen laskettuna. Pisteeksi valitaan piste, jonka ympäri rakennuksen oletetaan kaatuvan. Tällöin tulee osoittaa, että: $E_{d,dst} < E_{d,stab}$, missä $E_{d,dst}$ on tasapainoa heikentävien kuormien vaikutuksen mitoitusarvo, ja $E_{d,stab}$ on tasapainoa parantavien kuormien mitoitusarvo (SFS-EN 1990, 3.41). /1,4,5/

3.3 Käyttörajatilamitoitus

Mitoitukseen käyttörajatilassa kuuluvat kaikki ne tarkastelut, joita edellytetään rakeenteen käyttökelpoisuuden toteamiseen. /1 s.317/ Voidaankin sanoa, että käyttörajatilamitoituksella pyritään parantamaan ihmisten viihtyvyyttä. Se liittyy rakenteen toimintaan normaalikäytössä, ja rakennuskohteen ulkonäköön. Käyttörajatilassa tarkastellaan taipumia, värähtelyjä ja vaurioita, jotka vaikuttavat rakennuksen ulkonäköön, säilyvyyteen tai toimintaan, kuten jännitysten tai halkeamaleveyksien rajoittaminen. Korkeiden rakennusten jäykistystä mitoitettaessa saattaa värähtely tai rakenteiden taipuma muodostua mitoittavaksi tekijäksi. Jäykistävien rakenteiden värähtelyille ja taipumille ei ole eurokoodeissa määritelty erikseen raja-arvoa, vaan rakenteen kelpoisuus ja hyväksyttävyys arvioidaan tapauskohtai-

sesti. Suomessa taipuman ylärajana pidetään yleisesti rajaa $h/400$, missä h on rakennuksen korkeus. Vaakasiirtymien suuruus on harkittava tapauskohtaisesti erityisen tarkasti. Eurokoodissa vaakasiirtymien ylärajaksi on annettu sama $h/400$, mutta yleensä vaakasiirtymien ei sallita olevan noin suuria. /1,4,5/

4 ESIMERKKIMITOITUS

Taulukko 1. Esimerkkikohteen lähtötiedot.

Rakenneluokka	2
Palonkestoluokka	R60
Seuraamusluokka	CC2
Kuormaluokka	Luokka A, asuintilat
Betonin lujuusluokka	C30/37
Rasitusluokka	XC1 Kuivat sisätilat XC2 Perustukset XC3 ja 4 Julkisivut, sokkelit
Maastoluokka	2
Paikkakunta	Vaasa
Rakennuksen leveys B ₁	25m
Rakennuksen syvyys B ₂	13m
Rakennuksen korkeus H	9m

4.1 Kuormat

Rakenteiden kuormat mitoitetaan kuhunkin kohteeseen eurokoodien ja kansallisten liitteiden määräysten ja ohjeiden mukaisesti. Suomessa kantavien rakenteiden lujuutta, vakautta, paloturvallisuutta ja käyttöturvallisuutta koskevat vaatimukset on annettu Maankäyttö- ja rakennuslaissa a,b ja d §:ien perusteella annetuissa ympäristöministeriön asetuksissa kantavista rakenteista ja pohjarakenteista. Nämä

Suomen laissa esitetyt vaatimukset täyttyvät, kun mitoitus tehdään eurokoodin ja kansallisen liitteen mukaan. Rakennus voidaan myös suunnitella muita suunnittele- ja toteutusjärjestelmiä soveltaen, mutta silloin täytyy pystyä luotettavasti esittämään, että rakenteiden lujuus, vakaus, käyttöikä ja käyttökelpoisuus ovat vaatimusten tasolla. Rakentamismääräyskokoelman päivittämisestä ja ylläpitämisestä vastaa ympäristöministeriö Maankäyttö- ja rakennuslain 13 §:n mukaan. /8/

Jokaista rakennusta kuormittaa pysyvät kuormat ja muuttuvat kuormat. Rakennukseen kohdistuvia pysyviä kuormia ovat rakenteiden omat painot. Ulkoiset kuormat voidaan aina jakaa vaaka- ja pystykomponenteiksi, joita rungon eri osat kantavat taivutettuina, puristettuina, vedettyinä, vääntökuormitettuina tai leikkauskuormitettuina. Usein myös näiden yhdistelminä. Olennaista on kuitenkin, että kuormat siirtyvät osasta toiseen päätyen aina lopulta perustusten kautta maaperään. Omat painot saadaan laskettua valittujen materiaalien tiheyden ja tilavuuksien avulla. Minun esimerkkikohteessa jäykistävinä seininä toimii paikallavaletut kerroksen korkuiset betoniseinät, joiden omapaino on 2.5kN/m². Alapohjana toimii betonilaatta, jolla omapaino on sama kuin seinillä. Yläpohjana toimii ontelolaatat, vesikaton eristeet, sekä pintamateriaalit. Tässä esimerkissä niiden ajatellaan olevan 6kN/m². Välipohjana toimii omassa tasossaan jäykkinä levyinä ontelolaatat, joiden omapaino saumattuna + pintamateriaalit ajatellaan tässä työssä olevan 4kN/m². Jäykistävänä osana toimiva hissikuilu on paikallavalettu betonirakenne, jolle omapaino on 2.5kN/m².

Jokaista rakennusta kuormittaa myös muuttuvat kuormat, joita ovat: lumikuorma, tuulikuorma, sekä hyötykuormat, eli oleskelukuormat. Lumikuorma saadaan laskettua eurokoodin SFS-EN 1991-1-3 mukaan, sekä suomen kansallisen liitteen ohjeiden mukaan kaavalla:

$$q_k = s_k * u_l, \text{ missä}$$

s_k on lumikuorman ominaisarvo maanpinnalla, ja

u_l on muotokerroin.

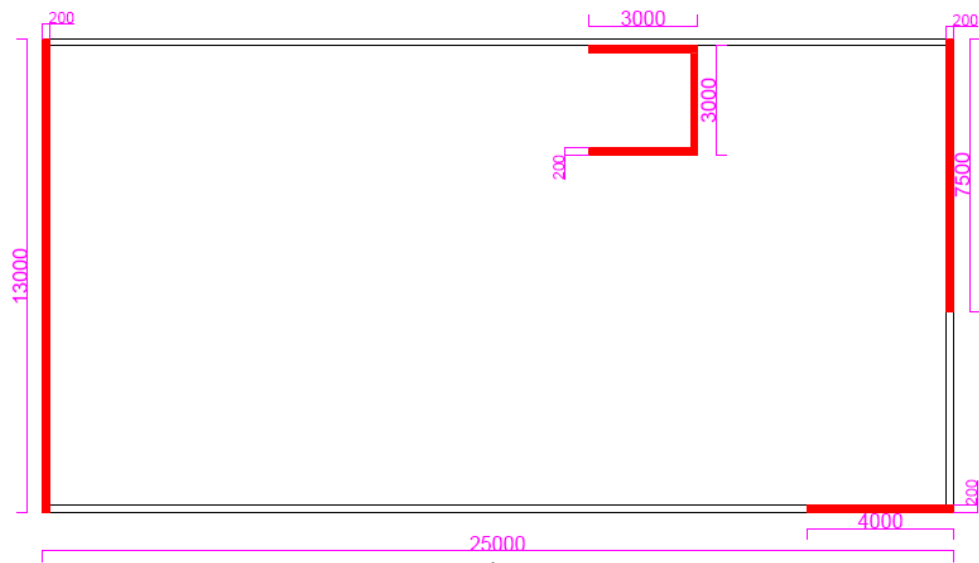
Esimerkkikohteessa lumikuorman ominaisarvo maanpinnalla on 2kN/m^2 ja muotokerroin 0,8, jolloin lumikuorman laskenta-arvoksi saadaan $1,6\text{kN/m}^2$.

Lisäksi rakennuksen muuttuvana kuormana huomioidaan hyötykuorma, eli oleskelukuorma. Tämä tulee siitä, että hyötykuormat aiheutuvat tilojen käytöstä. Hyötykuorman suuruuteen vaikuttaa tilan käyttötarkoituksluokka. Esimerkkikohde on käyttötarkoituksluokaltaan luokassa A, eli asuintiloissa, jollin hyötykuorman ominaisarvo on $2,0\text{kN/m}^2$.

Muuttuvina vaakasuuntaisina kuormina rakennusta rasittaa tuulikuorma, sekä rakenteiden vinoudesta, tai kuormien epäedullisemmasta vaikutussuunnasta johtuvat lisävaakavoimat. Esimerkkikohteen tuulikuormat on laskettu painemenetelmällä, jolloin saadaan jokaiselle seinälle paine tai imu tuulen vaikutussuunnasta riippuen. Tuulikuormat ja lisävaakavoimat esimerkkikohteesta liitteissä 1,2 ja 3.

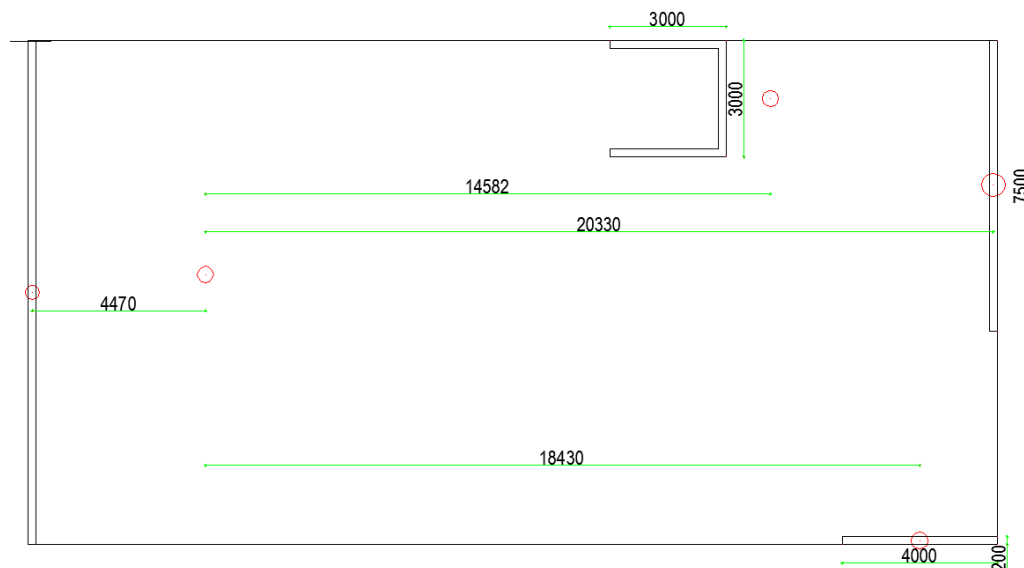
4.2 Mitoitus Mathcad -ohjelmiston avulla

Esimerkkimitoituskohde on kolme kerroksinen asuinkerrostalo. Kerrostalo suunnitellaan Vaasaan, ja maastoluokaltaan se kuuluu luokkaan 2. Rakennus on suorakaiteen muotoinen, ja sen korkeus $H = 9$ metriä. Pidemmän sivun leveys $B1 = 25$ metriä, ja lyhyemmän sivun leveys $B2 = 13$ metriä. Eli kerrosala on 325m^2 . Rakennuksessa on maanvarainen perustus, ja runkona toimii kerroksen korkuiset betoniseinät, ja välipohjina ontelolaatat. Jäykistävinä osina toimii kantavat, aukottomat seinät, jotka sijaitseva kerroksissa samassa paikassa, jolloin ne voidaan käsitellä rakennuksen korkuisina mastoina. Lisäksi jäykistävänä osana on rakennuksessa oleva hissikuilu. Välipohjat toimivat omassa tasossaan jäykkinä levyinä.



Kuva 1. Jäykistävät osat merkitty punaisella.

Tähän esimerkkikohteeseen tehdään jäykistysmitoitus Mathcadilla. Tulokseksi saadaan %-osuudet, mitä kukin seinä ottaa kuormasta. Rakennukseen kohdistuvat kuormat on esitetty kohdassa 4.1.



Kuva 2. Jäykistävien osien etäisyys kiertoakeskiöön.

Mitoituksen ensimmäisessä vaiheessa lasketaan jäykistävien seinien neliömomentti, eli hitausmomentti I_x , rakennuksen x-suunnassa. X-suunnaksi olen tässä työssä valinnut rakennuksen pidemmän sivun suunnan.

$$I_{x1} = \frac{0,2m * 13m^3}{12} = 36,62m^4$$

$$I_{x2} = \frac{3m * (3m)^3}{12} - \frac{2,8m - (2,6m)^3}{12} = 2,65m^4$$

$$I_{x3} = \frac{4m * (0,2m)^3}{12} = 2,67 * 10^{-3}m^4$$

$$I_{x4} = \frac{0,2m * (7,5m)^3}{12} = 7,03m^4$$

Yllä laskettu kunkin jäykistävän osan neliömomentti X-suunnassa. Jäykistävien osien numerointi on esitetty kuvassa 2. Kunkin osan neliömomentti saadaan siis laskettua kaavalla

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

missä b = jäykistävän osan leveys, ja h = jäykistävän osan pituus valitussa laskusuunnassa.

Mitoituksen toisessa vaiheessa selvitetään tuulen H-suuntaan, eli x-askelin ympäri aiheuttaman kiertokeskiön SC paikka. Omassa mitoituksessani olen valinnut laskennan 0-pisteeksi rakennuksen oikean reunan x-suunnassa.

$$l_{1x} = 25m - 0,1m = 24,9m$$

$$l_{3x} = \frac{4m}{2} = 2m$$

$$l_{4x} = \frac{0,2m}{2} = 0,1m$$

Hissikuilun painopisteen sijainti:

$$a = 2,8m \quad d = 2,9m$$

$$e_x = \frac{4 * (a + 3d) * d^2}{(a + 2d) * (a + 6d)} - \frac{3 * d^2}{a + 6d} = 0,978m$$

$$Y_{sc} = \frac{4 * (a + 3d) * d^2}{(a + 2d)(a + 6d)} = 2,23m$$

$$l_{2x} = 7m + 0,1m + e_x - Y_{sc} = 5.848m$$

$$e_{scx} = \frac{l_{1x} * I_{x1} + l_{2x} * I_{x2} + l_{3x} * I_{x3} + l_{4x} * I_{x4}}{I_{x1} + I_{x2} + I_{x3} + I_{x4}} = 20,043m$$

Yllä laskettu siis jokaisen jäykistävän osan painopisteen etäisyys l valittuun 0-pisteeseen, sekä kiertokeskiön etäisyys e_{scx} 0-pisteeseen.

Seuraavana lasketaan jäykistävien seinien neliömomentin I_y y-suunnassa, eli rakennuksen lyhyemmän sivun suunnassa. Neliömomentti lasketaan samalla kaavalla kuin mitoituksen ensimmäisessä vaiheessa.

$$I_{y1} = \frac{13m * (0,2m)^3}{12} = 8,667 * 10^{-3}m^4$$

$$I_{y2} = 2 * \left[\frac{0,2m * (3m)^3}{12} + 0,2m * 3,0m * (0,422m)^2 \right] + \frac{2,6m * (0,2m)^3}{12} + 2,6m * 0,2m * (0,978m)^2 = 1,613m^4$$

$$I_{y3} = \frac{0,2m * (4,0m)^3}{12} = 1,067m^4$$

$$I_{y4} = \frac{7,5m * (0,2m)^3}{12} = 5,0 * 10^{-3}m^4$$

Seuraavana, kuten yllä x-suunnassa, lasketaan tuulen V-suuntaan, eli y-akselin ympäri aiheuttaman kiertokeskiön paikka.

$$l_{1y} = \frac{13m}{2} = 6,5m$$

$$l_{2y} = \frac{3m}{2} = 1,5m$$

$$l_{3y} = 13m - 0,1m = 12,9m$$

$$l_{4y} = \frac{7,5m}{2} = 3,75m$$

$$e_{scy} = \frac{l_{1y} * I_{y1} + l_{2y} * I_{y2} + l_{3y} * I_{y3} + l_{4y} * I_{y4}}{I_{y1} + I_{y2} + I_{y3} + I_{y4}} = 6,035m$$

Kun kiertokeskiön paikka on saatu selville molemmissa suunnissa, niin voidaan laskea tuulen H ja V-resultantin vaikutusviivan etäisyys eH ja eV laskettuun kiertokeskiöön SC.

$$e_H = e_{scx} - \frac{25m}{2} = 7,54m \quad e_V = \frac{13m}{2} - e_{scy} = 0,465m$$

Tämän jälkeen lasketaan jokaisen jäykistävän osan voimavarret a kiertokeskiöön tuulen H-suuntaan kohtisuorasti. Jäykistävän osan 1 voimavarsi on miinusmerkillinen, sillä se sijaitsee kiertokeskiön vasemmalla puolella, eli voimavarsi on seinän painopisteen etäisyys kiertokeskiöön valitussa suunnassa.

$$a_{x1} = -4,470m$$

$$a_{x2} = 14,582m$$

$$a_{x3} = 18,34m$$

$$a_{x4} = 20,33m$$

$$I_{x1} * a_{x1}^2 = 731,701m^6$$

$$I_{x2} * a_{x2}^2 = 563,482m^6$$

$$I_{x3} * a_{x3}^2 = 0,90m^6$$

$$I_{x4} * a_{x4}^2 = 2,905 * 10^3 m^6$$

$$H_x = I_{x1} * a_{x1}^2 + I_{x2} * a_{x2}^2 + I_{x3} * a_{x3}^2 + I_{x4} * a_{x4}^2 = 4,201 * 10^3 m^6$$

Tämän jälkeen saadaan laskettua kunkin jäykistävän osan ottama kuorma %-osuutena, eli voimien jakautuminen jäykistäville seinille x-suunnassa:

$$I_{tot,x} = I_{x1} + I_{x2} + I_{x3} + I_{x4} = 46,3 m^4$$

$$e_H = 7,54 m$$

Seinän 1 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{x1}}{I_{tot,x}} + \frac{e_H * I_{x1} * a_{x1}}{H_x} = 49,7\%$$

Seinän 2 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{x2}}{I_{tot,x}} + \frac{e_H * I_{x2} * a_{x2}}{H_x} = 12,7\%$$

Seinän 3 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{x3}}{I_{tot,x}} + \frac{e_H * I_{x3} * a_{x3}}{H_x} = 0,015\%$$

Seinän 4 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{x4}}{I_{tot,x}} + \frac{e_H * I_{x4} * a_{x4}}{H_x} = 40,84\%$$

Viimeisessä vaiheessa tehdään samat tarkastelut y-suunnassa. Eli lasketaan seinien voimavarret a kiertokeskiöön tuulen V-suuntaan kohtisuorasti, sekä voimien jakautuminen jäykistäville osille.

$$a_{y1} = 0,458 m$$

$$a_{y2} = -4,335 m$$

$$a_{y3} = 6,865m$$

$$a_{y4} = -2,285m$$

$$I_{y1} * a_{y1}^2 = 1,818 * 10^{-3}m^6$$

$$I_{y2} * a_{y2}^2 = 30,308m^6$$

$$I_{y3} * a_{y3}^2 = 50,27m^6$$

$$I_{y4} * a_{y4}^2 = 0,026m^6$$

$$H_y = I_{y1} * a_{y1}^2 + I_{y2} * a_{y2}^2 + I_{y3} * a_{y3}^2 + I_{y4} * a_{y4}^2 = 80,606m^6$$

$$I_{tot,y} = I_{y1} + I_{y2} + I_{y3} + I_{y4} = 2,693m^4$$

$$e_v = 0,465m$$

Seinän 1 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{y1}}{I_{tot,y}} + \frac{e_v * I_{y1} * a_{y1}}{H_y} = 0,324\%$$

Seinän 2 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{y2}}{I_{tot,y}} + \frac{e_v * I_{y2} * a_{y2}}{H_y} = 55,86\%$$

Seinän 3 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{y3}}{I_{tot,y}} + \frac{e_v * I_{y3} * a_{y3}}{H_y} = 43,83\%$$

Seinän 4 ottama osuus kuormasta:

$$\frac{I_{y4}}{I_{tot,y}} + \frac{e_v * I_{y4} * a_{y4}}{H_y} = 0,18\%$$

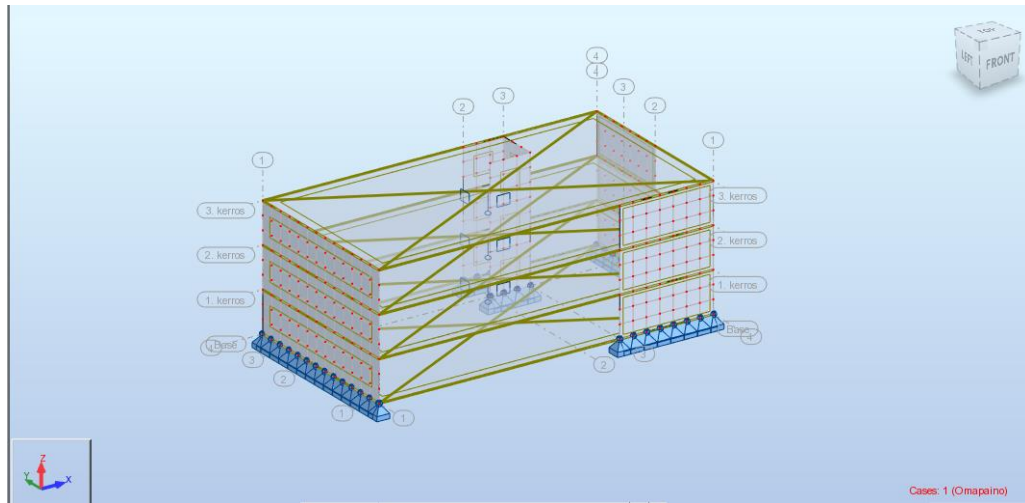
Tässä vaiheessa mitoitus tiedetään rakennusta rasittavat kuormitukset, sekä prosenttiosuudet, mitä kukin jäykistävä osa ottaa kuormasta. Seuraavana olisi siis mahdollista suunnitella betonirakenteille vaadittava rauditus. Tässä työssä aihe on kuitenkin rajattu vain jäykistysmitoitukseen, ei siis rauditusten suunnitteluun.

4.3 Mitoitus Autodesk Robot structural -ohjelmiston avulla

4.3.1 Robot-mallin luonti

Tässä opinnäytetyössä tehdään jäykistysmitoitus Autodesk Robot structural ohjelmalla samalle esimerkkikohteelle, jolle yllä on tehty jäykistysmitoitus käyttämällä Mathcadia. Kuormat ja rakennuksen mitat, sekä lähtötiedot ovat samat kuin kappaleissa 4.1. ja 4.2. Robot-mitoitus aloitetaan valitsemalla aloitusvalikosta sopiva projektimuoto. Esimerkkikohteeseen valitaan projektimuodoksi *Building Design*. Tässä projektimuodossa saadaan mallinnettua 3D-malli kohteesta, sekä pystytään käyttämään niin betoni-, kuin teräs- tai puurakenteita, tai näiden yhdistelmiä. Tämän jälkeen aukeavaan alkuäkymään luodaan moduuliverkosto valitsemalla oikeasta ylänurkasta *Axis Definition*. Tämän painikkeen alle voidaan syöttää linjojen sijainnit X-, Y- ja Z-koordinaatteina. Kun moduuliverkko on luotu, niin voidaan mallintaa rakenteita. Moduuliverkko toimii siis vain helpottamassa mallinnustyötä oikeine mittoineen ja korkoineen. Esimerkkikohteen mallintaminen aloitetaan rakennuksen alapohjasta, valitsemalla oikeasta reunasta kohta *floors*, johon määritellään alapohjan halutut ominaisuudet, eli materiaali, paksuus, ja haluttu laskentamalli. Esimerkkikohteessa valitaan *material* kohtaan C30/37 betoni, paksuudeksi *thickness* kohtaan 200 mm, ja laskentamalliksi *calculation model* kohtaan *slab-rigid diaphragm*. Laskentamalli valitaan siksi näin, että alapohja, sekä välipohjalaatat toimivat jäykkinä levyinä omassa tasossaan. Seuraavaksi mallinnetaan esimerkkikohteesta jäykistävät seinät, sekä jäykistävänä osana toimiva hissikuilu. Nämä saadaan oikeasta reunasta, kohdasta *walls*. Materiaaliksi valitaan betoni C30/37, ja *homogeneous* kohtaan syötetään paksuudeksi $th=200$ mm. Välipohjalaatat, sekä yläpohjan ontelolaatat mallinnetaan jälleen kohdasta *floors*. *Calculation model* kohdasta valitaan jälleen *slab-rigid diaphragm*, eli myös välipohjat ja yläpohja toimivat jäykkinä levyinä omassa tasossaan. *Orthotropic*-kohdasta

saadaan valittua *Hollow slab*, eli ontelolaatta, ja syöttämään halutut ontelolaattojen mitat, sekä materiaali.



Kuva 3. Rakennuksen jäykistävät osat Robot-mallissa.

Seuraavaksi voidaan syöttää ohjelmaan halutut kuormitukset, sekä luoda tarvittavat kuormitustapaukset, eli kuormayhdistelyt. Kuormitukset saadaan luotua oikeassa reunassa olevasta painikkeesta *Load types*. Kuormituksen numerointi ja asetukset esimerkkikohteessani ovat seuraavat:

Taulukko 2. Kuormitukset esimerkkikohteessa.

Case name:	Nature:	Subnature:
1. Omapaino	dead	structural
2. Pysyvä kuorma	dead	structural
3. Lumikuorma	snow	structural
4. Hyötykuorma	Luokka A	structural
5. Tuulikuorma +x	wind	structural
6. Tuulikuorma -x	wind	structural

7. Tuulikuorma +y	wind	structural
8. Tuulikuorma -y	wind	structural
9. Lisävaakavoima +x	dead	structural
10. Lisävaakavoima -x	dead	structural
11. Lisävaakavoima +y	dead	structural
12. Lisävaakavoima -y	dead	structural

Ensimmäinen kohta on rakenteiden omille painoille varattu kohta, ja numero 2 muille mahdollisille pysyville kuormille. Numero 3 on vesikatolle tuleva lumi-kuorma. Neljäs kohta on varattu rakennuksen hyötykuormalle. Kohdat 5 - 8 on jäykistykselle olennaisena kuormituksena laskettu tuulikuorma, joka syötetään joka suunnasta erikseen. Kohdat 9 - 12 on varattu lisävaakavoimille, jokaisesta suunnasta. Kuormat kyseisille kohdille saadaan syötettyä *Load definition* -painikkeen alta halutussa muodossa.

Kuormayhdistelyt saadaan luotua oikeasta alakulmasta kohdasta *Code combinations*, jolloin ohjelma tekee Eurokoodien mukaiset kuormayhdistelyt, ja pystytään tarkastelemaan jokainen mahdollinen kuormayhdistelmä.

4.3.2 Tulosten tulkinta

Laskentatuloksia pääsee tarkastelemaan *Results-menusta*, tai *Results layoutista*. Tuloksia voidaan tarkastella numeerisina taulukkomuotoisina tuloksina, diagrammeina, tai graafisina esityksinä. Laskentatuloksia tarkastellessa on valittava mitä kuormitustapausta, tai kuormitusyhdistelmää haluaa tarkastella. Jäykistysmitoitusta tehdessä tarkoituksena on, että rakennus saadaan tasapainoon, eikä siten kaadu. Robot-ohjelmasta on siis oleellista tarkastella pystyssä pitäviä voimia, ja sitä kautta pystyssä pitävää momenttia. Sen lisäksi tulee tarkistella kaatavia voi-

mia, ja niistä aiheutuvia kaatavia momentteja. Mitoituksen ehtona on, että pystyssä pitävä momentti on suurempi kuin kaatava momentti:

$$M_p > M_k, \text{missä}$$

M_p on pystyssä pitävä momentti, ja

M_k on kaatava momentti

Taulukkomuotoiset numeeriset tulokset voi tuoda Robotista myös Excel-muotoon *Conversion to EXCEL format* –valinnan avulla. Excel-muoto on usein käyttökelpoinen, sillä sen avulla voidaan jättää näkyviin vain oleelliset osat, mikä tekee tulosten tulkinnasta selkeämpää ja helpompaa. Sen avulla päästään myös muotoilemaan dokumentti muotoon, missä se annetaan työn tilaajalle.

Esimerkkikohteen tuloksia tarkastellessa tutkitaan ensimmäisenä rakennusta pystyssä pitäviä voimia, sekä niistä aiheutuvaa pystyssä pitävää momenttia. Rakennusta pitää pystyssä pystysuorat pysyvät kuormat, eli rakenteiden omat painot. Rakennuksen oma paino saadaan tarkasteltua *Results* -kohdasta, kun valittuna kuormituksista on omapaino.

Case 1	Omapaino					
Sum of val.	-0,00	0,00	8994,93	0,00	-0,00	0,00
Sum of reac.	-0,00	0,00	8994,93	60142,73	-113213,71	-0,00
Sum of forc.	0,0	0,0	-8994,93	-60142,73	113213,71	0,0
Check val.	-0,00	0,00	-0,00	0,00	-0,00	-0,00
Precision	4,63661e-12	7,09879e-17				

Kuva 4. Rakennuksen omapaino Robot-tuloksista.

Rakennuksen omapaino on siis 8994,93kN. Pystyssä pitävä momentti M_p saadaan laskettua kertomalla omapaino kertoimella 0,9, sekä etäisyydellä painopisteestä.

Pystyssä pitävät voimat:

Omapaino*0,9

8095,4 kN

Rakennuksen leveys

$b=$ 25 m

Voiman etäisyys painopisteestä

$e=$ 12,5 m

Pystyssä pitävä momentti:

$M_p=$ 101193 kNm

Pystyssä pitävä momentti on siis 101193 kNm, jota verrataan rakennusta kaata-
vaan momenttiin. Kaatavia momentteja syntyy tuulikuormasta, sekä lisävaaka-
voimista.

Lisävaakavoima pysyvistä kuormista

<i>Omapaino</i>	$g=$	8994,9 kN
<i>Momenttivarsi (h/2)</i>		4,5 m
<i>Lisävaakavoima</i>	$F=$	60,0 kN
<i>Lisävaakavoiman aiheuttama momentti</i>	$M_g=$	269,8 kNm

Lisävaakavoima hyötykuormista

<i>Hyötykuorma (Luokka A)</i>	$q_h=$	2 kN/m ²
<i>1. kerros</i>		
<i>Korkeus</i>	$h=$	3 m
<i>Pinta-ala</i>	$A=$	325 m ²
<i>Lisävaakavoima $q \cdot A/150$</i>	$F=$	4,3 kN
<i>Lisävaakavoiman aiheuttama momentti $F \cdot h$:</i>	$M_1=$	13 kNm
<i>2. kerros</i>		
<i>Korkeus</i>	$h=$	6 m
<i>Pinta-ala</i>	$A=$	325 m ²
<i>Lisävaakavoima $q \cdot A/150$</i>	$F=$	4,3 kN
<i>Lisävaakavoiman aiheuttama momentti $F \cdot h$:</i>	$M_2=$	26 kNm
<i>3. kerros</i>		
<i>Korkeus</i>	$h=$	9 m
<i>Pinta-ala</i>	$A=$	325 m ²
<i>Lisävaakavoima $q \cdot A/150$</i>	$F=$	4,3 kN
<i>Lisävaakavoiman aiheuttama momentti $F \cdot h$:</i>	$M_3=$	39 kNm

Lisävaakavoimien aiheuttama momentti yhteensä: $M_I=$ 78 kNm

Kaatavat momentit yhteensä: $M_k=$ 1888,2 kNm

Kaatumisvarmuus M_p/M_k : 53,6 OK!

Kaatavien momenttien summana kaatavaksi momentiksi tulee 1888,2kNm, jota verrataan pystyssä pitävään momenttiin. Pystyssä pitävä momentti on huomatta-
vasti suurempi, joten tasapainotarkastelun tuloksena voidaan todeta, että rakennus
ei kaadu. Robot -tulokset kokonaisuudessaan liitteessä 4.

Tasapainotarkastelun lisäksi Robotilla pystytään tutkimaan myös jäykistyksen onnistumisen kannalta muita oleellisia asioita, kuten rakenneosien muodonmuutoksia ja siirtymiä.

5 MITOITUSTEN VERTAILU

5.1 Mitoitustavan valinta

Vertaillessa mitoitustapaa tai ohjelmaa, jolla mitoitus tehdään, on ammattikäytössä ratkaisevana seikkana kokonaistaloudellisuus. Suunnittelijoiden on pyrittävä saamaan oikeita mitoitustuloksia ajallisesti mahdollisimman tehokkaasti, sekä pystyä esittämään tulokset työn tilaajalle selkeästi. Sopiva mitoitusohjelma, tai laskupohja on valittava tapauskohtaisesti ja käyttötarkoituksen laajuudesta ja tarpeellisuudesta riippuen.

Excel- tai Mathcad -pohjaisilla mitoituspohjilla pystytään tarkastelemaan nopeasti jokin tietty osa mitoituksesta. Verrattaessa tätä Robot, tai johonkin muuhun FEM-ohjelmaan, niin voidaan todeta, että nykypäivän FEM-ohjelmat antavat todella tarkasti ja laajasti tuloksia. FEM-ohjelmat ovatkin erittäin käyttökelpoisia, tehokkaita ja kokonaiskustannuksilta järkeviä valintoja, kun puhutaan suurten rakennusten mitoituksesta, ja kun tarkasteltavien rakenneosien ja mitoitustapausten määrä on suuri. Myös yksittäisten rakenneosien tai rakennuksen kokonaispainoa tutkiessa FEM-ohjelmistot ovat erittäin käyttökelpoisia, aikaa säästäviä ja luotettavia. Yksi merkittävimmistä hyödyistä FEM-ohjelmistoissa on, että ohjelma tekee kuormayhdistelyt automaattisesti, jolloin suunnittelija pystyy tarkastelemaan kaikki mahdolliset tapaukset, ja suorittamaan rakenneosan mitoituksen pahimman yhdistelmän mukaan. Verrattaessa tätä käsin mitoitukseen, on ajan säästö merkittävä. FEM-ohjelmistot ovat kehittyneet viimeisten vuosien aikana paljon, ja ne tulevat varmasti syrjäyttämään laskentapohjat tulevaisuudessa, vaikkakin varsinkin betonirakenteiden mitoituksessa käytetään vielä nykypäivänä pääasiassa laskentapohjia. Suurin hyöty FEM-ohjelmistoissa on niiden 3D-ominaisuudet, jolloin 3D-mallia pystytään siirtämään mallinnusohjelmasta mitoitusohjelmaan, tai toisin päin. Kolmiulotteinen malli rakenteesta auttaa myös suunnittelijaa hahmottamaan tilanteen. Tiedoista voidaan myös muodostaa kustannuslaskelmia, energialaskelmia ja arvioida aikatauluja työmaalle, mitkä vaatisivat enemmän työtä käytettäessä perinteisempiä laskupohjia, ja kaksiulotteisia malleja. Mitoituksen oppimisen kannalta käsin laskentaa voidaan pitää parempana keinona, sillä silloin suunnitte-

lija käy Eurokoodien ja kansallisten liitteiden vaatimat tarkastelut itse läpi, ja oppii helpommin ymmärtämään rakenteiden toimintaa. FEM-ohjelmistot pitävät nämä tarkastelut sisällään, ja antaa suunnittelijalle valmiita tuloksia. /19,20/

5.2 Tulosten vertailu

Vertaillessa mitoituksia, niin oleellista on, että tulokset ovat oikeita, realistisia, ja samoja riippumatta millä ohjelmalla mitoitus on tehty. Jäykistysmitoitusta vertaillessa hyviä vertailukohteita on kiertokeskiön paikka ja jäykistävien osien neliömomentit. Tutkittavia asioita ovat myös muodonmuutokset, siirtymät ja rakenteiden väsyminen. Vertailtavia asioita mitoitustavasta riippumatta on myös kuormien sijoittaminen ja vaikutus. Nykypäivän FEM-ohjelmistot mitoittavat rakenteet Eurokoodin mukaisesti, jolloin tulosten pitäisi olla samoja, kuin käsin laskien. Usein mahdolliset eroavaisuudet tuloksissa johtuukin pyöristysvirheistä. FEM -ohjelmistot laskevat usein suuremmalla määrällä desimaaleja, ja tällöin tulos on tarkempi. Myös käsin lasketut tulokset ovat kuitenkin riittävän tarkkoja. /20/

Valmiita laskupohjia tarjoavien yritysten laskupohjista saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavina, sillä laskennan kulku ja oikeellisuus on tarkastettu huolellisesti. Mahdolliset virheet johtuvatkin tällöin suunnittelijan väärin määrittelemistä asetuksista, kuormien laskun epätarkkuudesta, taikka virheellisistä lähtötiedoista. FEM -ohjelmistot antavat myös varmuudella oikeita ja luotettavia tarkkoja tuloksia, mutta suunnittelijan tekemälle virheelle ja ohjelmiston käytön osaamattomuudelle on suurempi riski verrattaessa usein suhteellisen yksinkertaisiin laskentapohjiin. Vertaillessa mitoituspohjien ja FEM -ohjelmistojen antamia tuloksia, niin usein mitoituspohjat antavat selkeämmin ja helpommin luettavan tuloksen, mutta taas FEM -ohjelmistot antavat huomattavasti enemmän tietoa ja dataa suunnittelijalle. Asiakkaalle esitettävä tulosraportti on kuitenkin oltava aina selkeä ja helpos-
ti luettava, tehtiin mitoitus sitten käsin, mitoituspohjalla, tai FEM -ohjelmistolla.

/21/

6 YHTEENVETO JA HAVAINNOT

Rakennesuunnittelijan on valittava jokaiseen kohteeseen vaatimusten ja lähtötietojen kannalta sopiva jäykistysjärjestelmä, joka tulee mitoittaa Eurokoodien ja kansallisen liitteen mukaan siten, että jäykistysjärjestelmä siirtää rakennusta kuormittavat vaakakuormat perustuksille ja sitä kautta maaperään. Lähtökohtana on, että rakenteen staattinen tasapaino on riittävä, eli varmistetaan, että rakennus ei kaadu. /1,3/

Jäykistykseen suunnittelussa tulee aina pystyä toteuttamaan kaksi perusvaatimusta:

1. Ilman suuria muodonmuutoksia tapahtuva vaakasuorien kuormien siirtyminen.
2. Pystyrakenteiden stabiiliuden säilyttämien ja varmistaminen. /1 s.180/

Betonirakennuksen jäykistysmitoitus voidaan jakaa karkeasti neljään osaan: jäykistysjärjestelmän valintaan, alustavaan jäykistysuunnitteluun, asennusaikaisen jäykistykseen suunnitteluun, ja lopullisen jäykistykseen suunnitteluun. Jokainen rakennus tulee mitoittaa myös sekä murtorajatilassa, että käyttörajatilassa. Mitoitukseen käyttörajatilassa kuuluvat kaikki ne tarkastelut, joita edellytetään rakenteen käyttökelpoisuuden toteuttamiseen. Näitä ovat taipumat ja värähtelyt, sekä vauriot jotka aiheuttava rakennuksen ulkonäölle haittoja. Murtorajatilat ovat käyttörajatilan jälkeen kuorman lisääntymisen myötä kehittyviä tiloja, joissa rakenne tai sen osa menettää käyttökelpoisuutensa. Mitoitettaessa rakennusta jäykistäviä rakenteita, niin tarkasteltavia murtorajatilajoja on jäykän kappaleen tai sen osan tasapainon menetys, liian suuret siirtymätilat, ja rakenteen tai osan muuttuminen mekanismiksi. /9/

Rakenteiden kuormat mitoitetaan kuhunkin kohteeseen eurokoodien ja kansallisten liitteiden määräysten ja ohjeiden mukaisesti. Jokaista rakennusta kuormittaa pysyvät kuormat ja muuttuvat kuormat. Pysyviä kuormia ovat rakenteiden omat painot, muuttuvia taas hyötykuormat, lumikuormat, sekä tuulikuormat ja lisävaakavoimat. Jäykistävät pystyrakenteet saavat kuormat kultakin tasorakenteelta jäykkyyksiensä suhteessa. Jäykistysrakenteita mitoitettaessa on selvitettävä kunkin rakenteen todelliset jäykkyydet mahdollisimman tarkasti. Mitoitustyövälineitä on useita, ja sopiva väline tuleekin valita tapauskohtaisesti mahdollisimman tehok-

kaaksi ja kokonaistaloudellisesti järkeväksi. Riippuen työn laajuudesta ja mitoitettavien osien määrästä, on valittava valmiin mitoituspohjan, tai FEM-ohjelman väliä. /8/

Pääasiallisimmat Suomessa käytetyt jäykistysjärjestelmät ovat mastojäykistys, kehäjäykistys, levyjäykistys, ristikkojäykistys, ja usean jäykistysjärjestelmän yhdistely. Mastojäykistys voidaan jakaa vielä kolmeen alatyyppiin: mastopilarijäykistykseen, mastoseinäjäykistykseen ja jäykistystorniin. Mastopilarijäykisteisen jäykistysjärjestelmän pääasialliset käyttökohteet ovat matalahkot rakennukset, noin 1-4 kerroksiset. Mastoseinäjäykistyksellä pystytään toteuttamaan myös korkeampia rakennuksia. Kehäjäykistysjärjestelmää käytetään lähinnä paikallavaletuihin rakennuksiin, ja sen etuna voidaan pitää, että päästään vapaampaan tilojen käyttöön. Levyjäykistyksessä toimintaperiaatteena on, että levymäiset rakenteet jäykistävät seinät, tällöin päästään usein pienempiin perusratkaisuihin, sillä jäykistäviä seiniä on tässä järjestelmässä usein monta. Ristikkojäykistys perustuu puristettuihin ja vedettyihin sauvoihin, ja sen ehdottomana etuna voidaan pitää vähäistä tilantarvetta. Usein sitä käytetään myös työmaalla asennusaikaisena jäykistysjärjestelmänä, ennen kuin varsinainen jäykistysjärjestelmä on valmis. Useiden jäykistysjärjestelmien yhdistelyllä haetaan usein tarkoituksenmukaisuutta, ja kokonaistaloudellisesti edullisinta ratkaisua. Se sopii erityisen hyvin suuriin tai korkeisiin rakennuksiin. /1,3,6/

Opinnäytetyössä päästiin haluttuun lopputulokseen, joka esittelee jäykistysjärjestelmät, niiden käyttökohteet, positiiviset ja negatiiviset ominaisuudet, sekä jäykistysmitoituksen Mathcadilla ja tasapainotarkastelun Autodesk Robot structural FEM -ohjelmalla. Jatkotutkimusaiheena voisi olla raudoitusten suunnittelu FEM-ohjelmilla, sekä eri ohjelmistojen käyttökelpoisuuden vertailu tilanteesta riippuen.

LÄHTEET

- /1/ Matti V. Leskelä 2005, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, by210, Libris Oy, Helsinki 2006. Suomen Betonitieto Oy.
- /2/ Suomen betoniyhdistys ry, Betoninormit 2004 by50, Suomen betonitieto Oy, Helsinki 2004
- /3/ Viitattu 9.2.2018, 23.2.2018, 24.2.2018, 17.3.2018, 18.3.2108, 14.4.2108
<http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/rakennejarjestelmat/rakennuksen-jaykistys>
- /4/ Suomen betoniyhdistys ry, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1 by211, BY-koulutus OY, Vantaa 2013
- /5/ Suomen betoniyhdistys ry, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 2 by211, BY-koulutus OY, Tampere 2015
- /6/ Suomen betoniyhdistys ry, Betonirakenteiden perusteiden oppikirja by203, Suomen betonitieto Oy, Jyväskylä 1995
- /7/ Suomen betoniyhdistys ry, Betonitekniikan oppikirja by201, Suomen betonitieto Oy, Jyväskylä 1998
- /8/ <http://www.ym.fi/rakentamismaaraykset>
- /9/ RTT rakennusteollisuus ry, Valmisosarakentaminen: 2, osa G, Elementtirakennuksen jäykistäminen, Suomen betonitieto
- /10/ Matti Makkonen 2009, Autodesk Robot structures – ohjelman perusteet, VAMK
- /11/ Viitattu 12.4.2018
<http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F5Hlr3/FES05.pdf>
- /12/ Viitattu 13.4.2018 <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/mihin-betonia-kaytetaan/>
- /13/ Viitattu 13.4.2018 <http://www.valmisbetoni.fi/suunnittelu/runkojarjestelmat>
- /14/ Viitattu 15.4.2018 <https://fi.wikipedia.org/wiki/Normaalivoima>
- /15/ Viitattu 15.4.2018 <https://fi.wikipedia.org/wiki/Liikuntasauva>
- /16/ Viitattu 15.4.201 <https://www.sfs.fi/aihealueet/eurokoodit>
- /17/ Viitattu 20.1.2018 <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>

/18/ Viitattu 20.1.2018 <https://www.contria.fi/>

/19/ Viitattu 1.5.2018 https://fi.wikipedia.org/wiki/Rakennuksen_tietomalli

/20/ Viitattu 1.5.2018

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21523/lehtonen.pdf?sequence=1>

/21/ Viitattu 1.5.2018 <https://skol.teknologiateollisuus.fi/eurocode-laskentapohjat>

LIITE 1

Maastoluokka =	2
Tuulen nopeuden perusarvo =	21
Maaston kaltevuus Φ =	0
Sijaintikerroin S =	0,8
Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³
Korkeus maanpinnasta z =	9 m

Rakennuksen mitat:

h =	9,0	m
d =	25,0	m
b =	13,0	m

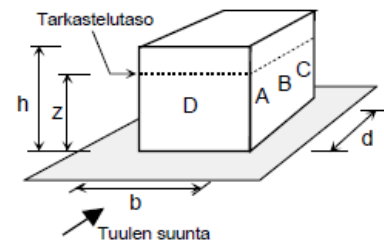
Sisäisen paineen kertoimet:

Ylipaine C _{pi} =	0,20
Alipaine C _{pi} =	-0,30
Pinta-ala A =	39 m ²

Puuskanopeuspaine:

$$q_p(z) = 630,0 \text{ N/m}^2$$

$$q_p(h) = 630,0 \text{ N/m}^2$$



Kuormat seinässä:

Seinässä D suunta on sisäänpäin, muissa ulospäin.

	Kuorma	Leveys
A:	882,0 N/m ²	2,6 m
B:	630,0 N/m ²	10,4 m
C:	441,0 N/m ²	12 m
D:	639,3 N/m ²	13,0 m
E:	333,5 N/m ²	13,0 m

LIITE 2

Maastoluokka =	2
Tuulen nopeuden perusarvo =	21
Maaston kaltevuus Φ =	0
Sijaintikerroin S =	0,8
Ilman tiheys ρ =	1,25 kg/m ³
Korkeus maanpinnasta z =	9 m

Rakennuksen mitat:

h =	9,0	m
d =	13,0	m
b =	25,0	m

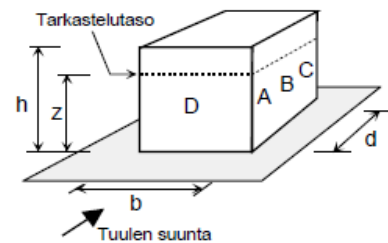
Sisäisen paineen kertoimet:

Ylipaine Cpi =	0,20
Alipaine Cpi =	-0,30
Pinta-ala A =	225 m ²

Puuskanopeuspaine:

$$q_p(z) = 630,0 \text{ N/m}^2$$

$$q_p(h) = 630,0 \text{ N/m}^2$$



Kuormat seinässä:

Seinässä D suunta on sisäänpäin, muissa ulospäin.

	Kuorma	Leveys
A:	882,0 N/m ²	3,6 m
B:	630,0 N/m ²	9,4 m
C:	441,0 N/m ²	0 m
D:	667,2 N/m ²	25,0 m
E:	389,3 N/m ²	25,0 m

LIITE 3

Lisävaakavoimat:

Lisävaakavoima pysyvistä kuormista

Omapaino

$$g = 8994,9 \text{ kN}$$

Momenttivarsi ($h/2$)

$$4,5 \text{ m}$$

Lisävaakavoima

$$F = 60,0 \text{ kN}$$

Lisävaakavoima hyötykuormista

Hyötykuorma (Luokka A)

$$q_h = 2 \text{ kN/m}^2$$

1. kerros

Korkeus

$$h = 3 \text{ m}$$

Pinta-ala

$$A = 325 \text{ m}^2$$

Lisävaakavoima $q \cdot A/150$

$$F = 4,3 \text{ kN}$$

2. kerros

Korkeus

$$h = 6 \text{ m}$$

Pinta-ala

$$A = 325 \text{ m}^2$$

Lisävaakavoima $q \cdot A/150$

$$F = 4,3 \text{ kN}$$

3. kerros

Korkeus

$$h = 9 \text{ m}$$

Pinta-ala

$$A = 325 \text{ m}^2$$

Lisävaakavoima $q \cdot A/150$

$$F = 4,3 \text{ kN}$$

LIITE 4

Rakennuksen omanpainon aiheuttama kuormitus (kN):

Case 1	Omapaino		
Sum of val.	-0,00	0,00	8994,93
Sum of reac.	-0,00	0,00	8994,93
Sum of forc.	0,0	0,0	-8994,93
Check val.	-0,00	0,00	-0,00
Precision	4,63661e-12	7,09879e-17	

Lumikuorman aiheuttama kuormitus (kN):

Case 3	Lumikuorma		
Sum of val.	-0,00	0,00	520,00
Sum of reac.	-0,00	0,00	520,00
Sum of forc.	0,0	0,0	-520,00
Check val.	-0,00	0,00	-0,00
Precision	7,53335e-12	4,62626e-16	

Tuulikuorman aiheuttama kuormitus, tuuli +x-suunnasta (kN):

Case 5	stab tuuli +x		
Sum of val.	-94,18	10,71	-0,00
Sum of reac.	-94,18	10,71	-0,00
Sum of forc.	94,18	-10,71	0,0
Check val.	0,00	-0,00	-0,00
Precision	2,74065e-10	8,52581e-15	

Tuulikuorman aiheuttama kuormitus, tuuli -x-suunnasta (kN):

Case 6	stab tuuli -x		
Sum of val.	76,05	38,43	0,00
Sum of reac.	76,05	38,43	0,00
Sum of forc.	-76,05	-38,43	0,0
Check val.	0,00	0,00	0,00
Precision	2,29069e-10	4,04478e-14	

Tuulikuorman aiheuttama kuormitus, tuuli +y-suunnasta (kN):

Case 7	stab tuuli +y		
Sum of val.	25,74	-52,74	0,00
Sum of reac.	25,74	-52,74	0,00
Sum of forc.	-25,74	52,74	0,0
Check val.	-0,00	-0,00	0,00

Tuulikuorman aiheuttama kuormitus, tuuli -y-suunnasta (kN):

Case 8	stab tuuli -y		
Sum of val.	51,48	42,66	0,00
Sum of reac.	51,48	42,66	0,00
Sum of forc.	-51,48	-42,66	0,0
Check val.	0,00	0,00	0,00